橋軸直角方向を対象とした高架橋模型の地震時挙動とその解析

宇都宮大学大学院 〇 学生員 緒方 友一 , 中野 貴代美 宇都宮大学大学院 正会員 中島 章典 , 横川 英彰

1. はじめに

構造物の地震時応答性状は徐々に明らかにされており, 兵庫県三木市に建設された実大3次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)などでは,実構造物の大地震時3次元挙動の 解明に関して有益な成果を上げつつある¹⁾.また橋梁の地震 時挙動の数値解析を行い,その結果を設計に反映させる必要 性がますます高まっており,橋梁の動的挙動を数値解析によ り精度良く再現することが求められている.橋梁の中でも, 高架橋は高速道路や鉄道橋といった独立した交通網を作るう えで多く用いられ,特に耐震性能が重要視される.1995年 兵庫県南部地震以後,高架橋の耐震設計においては,ライフ ラインとしての機能確保が大きな課題となっている.そのた め,高架橋の大地震時の正確な挙動を予測する研究が精力的 に進められている²⁾.

一方,地震など外的作用を受ける橋梁の動的応答を数値解 析により精度良く求める際には,剛性,質量の正確なモデル 化の他に,実際の橋梁構造物に存在する減衰要因を適切に考 慮する必要がある.このような視点から,橋梁の減衰に関す る研究により種々の既存橋梁の振動実験データが整理され, 減衰定数に関しても貴重なデータが提示されている³⁾.著者 らの既往の研究⁴⁾では,鋼製部材のみを用いた橋脚模型と上 部構造部材および可動・固定支承で構成された簡易な高架橋 模型を用いて橋軸方向加振を対象とした振動台実験を行い, また,平面骨組要素を用いた動的複合非線形解析を実施し, 実験結果と解析結果の比較を行っている.この時,特に各構 成部材の減衰性状に着目した部分実験を行い,その結果を解 析モデルに組込むことによって高い再現性を得ている.

現行の道路橋示方書・同解説(V 耐震設計編)では,水平 面内の地震時挙動に対して任意方向の慣性力は水平2方向の 慣性力の作用として表すことができ,これら2方向の慣性力 を独立に作用させてよいと規定されている.そのため,橋梁 の耐震性は,一般に橋軸方向と橋軸直角方向の地震波の1方 向入力に対してそれぞれ独立して照査されている.既往の研 究⁴⁾の検討により,各減衰要因を部分実験や試行錯誤によっ てモデルに組込むことで動的弾塑性解析は高い再現性が得ら れることが確認された.しかし,この減衰要因のモデル化の 有用性を実証するには,橋軸直角方向へ加振した場合の検討 も不可欠である.

そこで本研究では,まず既往の研究⁴⁾と同様の高架橋模型 を用いて,現行の道示Vに従い橋軸方向および橋軸直角方 向をそれぞれ独立して1方向毎に振動実験を行う.次に各減 衰要因を取り込んだ高架橋モデルを用いた動的解析結果と実 験結果の比較を行う.本研究では特に,橋軸直角方向加振時 の地震時挙動を再現するための減衰要因のモデル化に着目し て,再現性を確認することを目的とする.

Key Words: 振動台実験, 減衰, 数値解析, 橋軸直角方向



図-1 高架橋模型

表-1 断面諸量

部材		寸法	単位体積重量
	(単位)	$\mathrm{mm} \mathbf{x} \mathrm{mm}$	$\rm kN/m^3$
橋脚	平鋼 1	19.86×11.74	75.98
	上鋼板	126.06×100.18	75.36
	下鋼板	300.25×300.38	76.3
上部構造	平鋼 2	37.47×15.62	76.89

2. 高架橋模型の振動実験

本研究では,図-1に示す鋼製部材と支承模型で構成され る簡易な高架橋模型を対象として自由振動実験および種々の 地震波による振動台を用いた強制振動実験を行った.なお, 本研究で使用した高架橋模型は,矩形断面を有する2本の橋 脚部材,上部構造部材,支承(固定支承,可動支承)から構 成されるものである.試験体に用いた鋼材の寸法を表-1に 示す.高架橋模型を対象とした振動実験を行う際の計測項目 は8項目とした.まず,固定支承側橋脚,可動支承側橋脚, 両方の橋軸方向と橋軸直角方向の基部の応答ひずみ,また上 部構造中央部の両方向の応答ひずみ,可動支承の可動部変位 および振動台面上の強制振動時の加振方向への加速度を計測 した.今回は両橋脚の応答ひずみのみを示す.

(1) 自由振動実験

高架橋模型を対象とした自由振動実験においては,まず は加振方向を橋軸方向として可動支承に変位が生じるよう に,固定支承側橋脚上部を引張って離した後の減衰自由振 動状態にある応答を測定した.次に橋軸直角方向を対象と して,両橋脚の上部を引張って同時に離した後の自由振動状 態の応答を計測した.ひずみおよび可動支承部の水平変位 のデータ測定にはデジタル動ひずみ測定器を使用し,自由振 動実験における各データのサンプリング周波数は1000Hz(測

I -036

〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院工学研究科情報制御システム科学専攻 Tel.028-689-6208 Fax.028-689-6208



図-3 高架橋模型の橋軸直角方向自由振動 FFT

定間隔 1/1000s),測定時間は 8.192s とした.橋軸方向への 加振後の両橋脚の基部の自由振動状態での応答は,両橋脚 が同断面であり,摩擦の大きい支承を用いていることから, 可動支承の変位は 1,2 波程度で収まり,その後は両橋脚が同 様に振動するモードとなった.応答ひずみをFFT 解析する ことによって得られる卓越振動数は,支承に変位が生じてい ない場合が 7.08Hz,支承に変位がある場合には計測された 1 波の周期から算出し,5.4Hz となった.橋軸直角方向への 加振後の両橋脚の基部の応答ひずみを図-2 に示す.両橋脚 は同様の応答波形を示しており,橋軸直角方向へ両橋脚が同 じ振動モードで振動していることが確認できる.図-3 に示 す応答ひずみのFFT 解析結果から得られる卓越振動数は, 10.62Hz となった.

(2) 強制振動実験

強制振動実験において橋軸方向には,加振する場合にJMA 神戸地震波,JMA 釧路地震波を,橋軸直角方向に加振をす る場合には,同様の地震波に加えて,JMA 神戸地震波の振 動数を調整した地震波を用いて,橋脚基部の応答ひずみが降 伏ひずみを越える振動実験も行った.JMA 神戸地震波を用 いて橋軸直角方向へ加振した場合の両橋脚の基部の応答ひず みを図-4 に示す.また,その応答ひずみのFFT 解析結果を 図-5 に示す.



図-4 高架橋模型の橋軸直角方向強制振動



図-5 高架橋模型の橋軸直角方向強制振動 FFT

3. 数值解析

(1) 固有振動数の比較

橋脚および上部構造部材は,1節点6自由度の立体骨組要 素によりモデル化し,図-6に示すように30節点29要素で モデル化した.また,橋脚基部と支承部にはばね要素を挿入 した.この場合,鉛直ばねと2つの水平ばねおよび各方向ま わりの回転ばねが必要となり,計6つのばねで要素を構築し ている.自由振動実験から得られた各振動モードの固有振動 数と固有値解析から得られた固有振動数を表-2に示す.実 験結果と解析結果はおおむね一致していることから,高架橋 模型の剛性,質量に関して適切にモデル化ができていると考 えられる.

(2) 減衰のモデル化

地震などを受ける橋梁の動的応答を数値解析より精度良く 求める際には,正確なモデル化の他に,実際の橋梁構造物に 存在する減衰要因を適切に考慮する必要がある.本研究では 各要素実験より得られた減衰性状をその要因に則してモデル に組込む.

a) 構成部材の自由振動実験

構成要素である橋脚部材および上部構造部材の固有振動数 および減衰特性を把握するために,同断面を有する単柱模型 を自由振動させ,その時の基部の応答ひずみを計測する.固 有振動数は自由振動時の応答ひずみのFFT 解析結果から,



図-6 解析モデル

表-2 固有振動数の比較

卓越振動モード	実験 (Hz)	解析 (Hz)
橋軸 (支承変位あり)	5.4	5.62
橋軸 (支承変位なし)	7.08	7.16
上部構造曲げ	16.11	16.08
橋軸直角	10.62	10.96



図-7 部材の自由振動波形

減衰特性は自由振動波形から得られる.橋脚部材と同断面 を有する単柱模型の自由振動波形を図-7に示す.上段は断 面の弱軸方向の応答ひずみ,下段は強軸方向の応答ひずみ である.この応答ひずみはそれぞれの方向の一次振動数のみ の振動とするため,数値フィルタを用いて余分な振動数の波 をカットしている.鋼材の材料内部減衰に起因する粘性減衰 を,既往の研究⁴⁾を参考にして,剛性比例型の減衰マトリッ クスとしてモデル化をした.平面骨組要素を利用した既往の 研究では,減衰マトリックスを構成する際,剛性マトリック スに減衰定数と固有振動数を用いて算出した係数を乗じて構 成していた.立体骨組を利用する本研究でも,強軸と弱軸で 得た減衰に関する上述の係数の平均値を用いて剛性比例型の 減衰マトリックスを構成するものとする.

b) 橋脚基部のばね,ダッシュポットの同定

既往の研究⁴⁾より,上部に重りをつけた橋脚模型や高架橋 模型では,大応答時に材料内部減衰以外に減衰が作用して おり,橋脚基部にばね,ダッシュポットを考慮することによ



図-8 重りあり橋脚基部のひずみの振動波形



図-9 重りあり橋脚基部のひずみ振幅と波数の関係

り再現性が高まることを確認している.本研究においても重 りつきの橋脚模型の強軸,弱軸方向の基部のばね定数とダッ シュポットの減衰係数を同定する.例として,上部構造重量 に相当する重りをつけた橋脚模型を弱軸方向へ自由振動さ せた時の応答ひずみを図-8の上段に,重りつき橋脚模型を モデル化し,材料内部減衰のみを考慮した解析結果を下段に 示す.両者を比較すると明らかに材料内部減衰のみでは減衰 が小さいため,実験結果との差分を基礎からの逸散減衰と考 え,図-9のように解析結果が実験結果に一致するように基 部のばね定数とダッシュポットの減衰係数を同定した.部材 の強軸方向は,橋軸直角方向に対応するため,上部構造重量 の半分程度に相当する重りをつけて加振を行い自由振動状態 の応答ひずみを得た.こちらも実験結果と解析結果の比較か ら基部のばね定数とダッシュポットの減衰係数を同定した.

c) 可動支承部の摩擦減衰の考慮

支承部は6つのばねからなる要素として考慮し,可動支承 の可動部を表す水平ばねには動摩擦試験から得た摩擦力を考 慮した復元力特性を有する非線形ばねとし,それ以外のばね には基本的には弾性ばねを仮定した.橋軸直角方向加振を対 象とした場合,支承の可動部による摩擦減衰や回転部の影響 はほとんどなく,ほぼ固定状態であると考えられる.しかし 実際には,可動支承に若干の変位が生じることによりがたつ きが見られ,減衰が生じている可能性がある.そこで,可動 支承部の橋軸直角方向の水平ばねも復元力特性を有する非線 形ばねとして考慮し,必要に応じて試行錯誤により値を決定 した.





(3) 解析結果

実験結果において示した,着目している橋軸直角方向への 加振を対象とした動的解析の結果を示す.

a) 自由振動の解析結果

まず,材料内部減衰と基部からの逸散減衰を考慮した場合 の動的解析結果を図-10に示す.解析結果は図-2に示した 実験結果と比較して,固有振動数はおおむね一致している が,解析結果は減衰が非常に小さく減衰のモデル化に不足が あることが考えられる.また実験結果の減衰性状は粘性的で はなく,摩擦力が働いているような性状になっていることか ら,可動支承部の橋軸直角方向の水平ばねを非線形ばねとし て考慮し,履歴減衰が働くようにして動的解析を行った.履 歴減衰を加えた解析結果を図-11に示す.解析結果は実験結 果をおおむね再現できており,自由振動状態の応答を再現で きる減衰のモデル化ができたと考えられる.材料内部減衰と 基部からの逸散減衰に加えて可動支承部の橋軸直角方向への 減衰を考慮する形で強制振動の動的解析を行う.

b) 強制振動の解析結果

強制振動の動的解析に用いる入力地震動は,実験時に加速 度計を用いて振動台面上で計測した加速度データを利用す る.橋軸直角方向への加振を想定した解析結果を図-12に, そのFFT解析結果を図-13に示す.図-4,図-5に示した 実験結果と比較して,解析結果はおおむね応答性状や減衰性 状を再現できていると考えられる.



4. おわりに

本研究では,まず鋼製部材を用いた橋脚と上部構造および 可動・固定支承のみで構成された簡易な高架橋模型を用いて 橋軸直角方向加振を対象に振動台実験を行った.次に減衰の モデル化に着目して,再現性を確認するために,要素実験結 果を反映した解析モデルを構築し解析を行い,実験結果と解 析結果の比較を行った.この時材料内部減衰は,部材ごとに 得た一定の係数を利用して剛性比例型で構成した.

その結果,要素実験から得られた材料内部減衰と基部から の逸散減衰を考慮し,さらに可動支承部に橋軸直角方向へ履 歴減衰を考慮することにより高い再現性が得られた.また, この解析モデルを利用した強制振動時の動的解析は実験結果 をおおむね良好に再現できることが確認できた.

参考文献

- 1) 右近大道,梶原浩一,川島一彦: E-Defense を用いた大 型橋梁実験における計測計画,第10回地震時保有耐力法 に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文 集, pp.29-34, 2007.2.
- 宇佐美勉編著:鋼橋の耐震・制振設計ガイドライン,日本鋼構造協会,技報堂,2006.9.
- 3) 竹田哲夫,山野辺慎一,新原雄二:実測データに基づく PC 斜張橋の減衰特性について,土木学会論文集,No.626/I-48,pp.147-161,1999.7.
- 4) 横川英彰,中島章典,笠松正樹,緒方友一:減衰要因 に着目した高架橋模型の非線形挙動に関する振動台実 験と数値解析,土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.62, pp.205-206, 2007.9.